

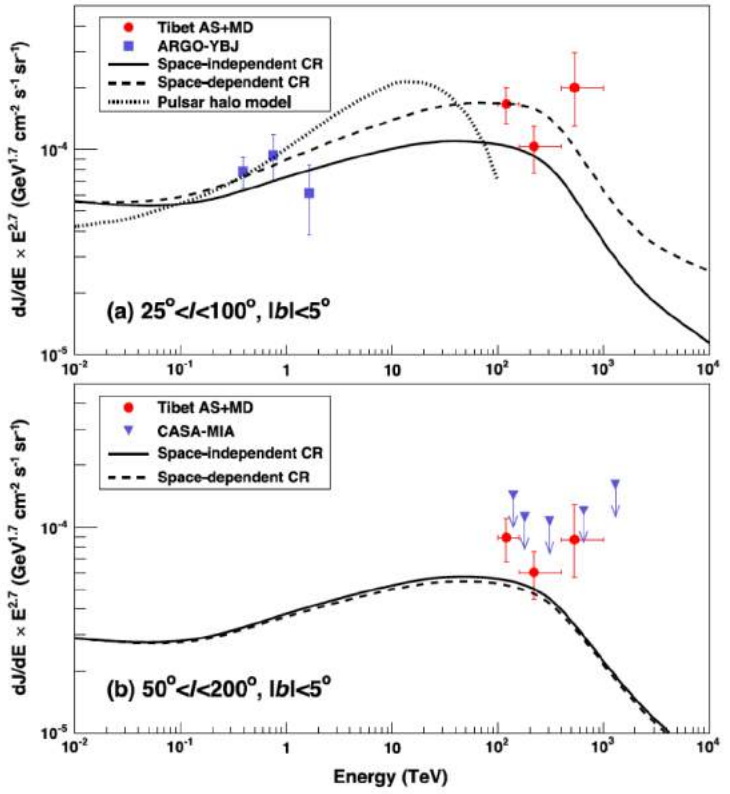
超新星残骸HB9における 最大加速エネルギーの 時間発展の測定

岡 知彦 (京都大学)

「超新星残骸=ペバトロン」を検証したい

- ☑ SNRが銀河系内宇宙線起源の有力候補であるが観測的証拠は揃っていない
- ☑ PeV陽子がいれば、陽子陽子衝突を経て100 TeV程度のガンマ線を放射する

100 TeV系内拡散ガンマ線の検出
[Tibet Collaboration, 2021]



✓ 系内PeVatronの存在を支持

系内100 TeV天体 12個の検出
[LHAASO Collaboration, 2021]

Article
Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources

<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03498-z>
Received: 21 October 2020
Accepted: 26 March 2021
Published online: 17 May 2021

A list of authors and affiliations appears at the end of the paper.

The extension of the cosmic-ray spectrum beyond 1 petaelectronvolt (PeV; 10^{15} electronvolts) indicates the existence of the so-called PeVatrons—cosmic-ray factories that accelerate particles to PeV energies. We need to locate and identify such objects to find the origin of Galactic cosmic rays¹. The principal signature of both electron and proton PeVatrons is ultrahigh-energy (exceeding 100 TeV) γ radiation.

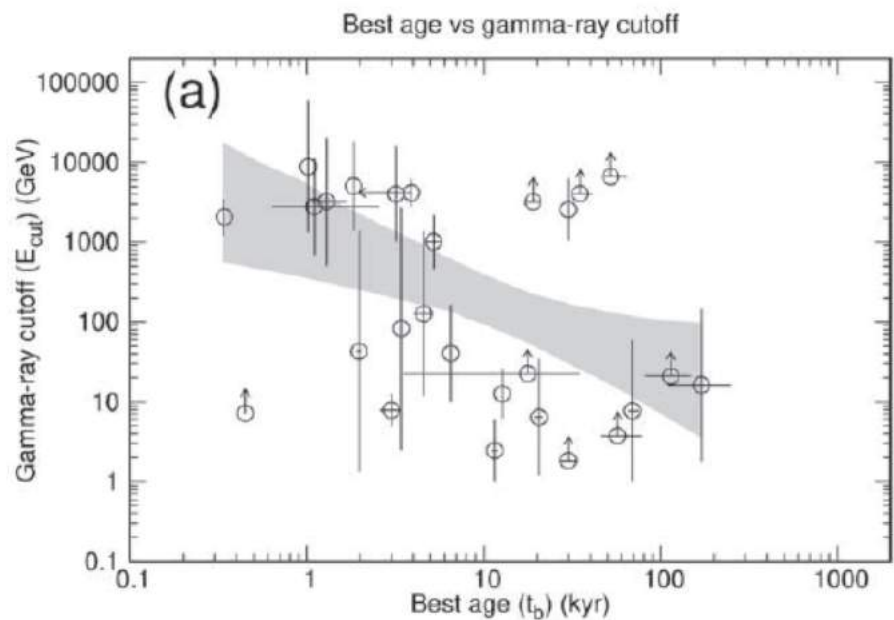
LHAASO Source	Possible Origin	Type	Distance (kpc)	Age (kyr) ^a	L_e (erg/s) ^b	Potential TeV Counterpart ^c
LHAASO J0534+2202	PSR J0534+2200	PSR	2.0	1.26	4.5×10^{36}	Crab, Crab Nebula
LHAASO J1825-1326	PSR J1826-1334	PSR	3.1 ± 0.2^d	21.4	2.8×10^{36}	HESS J1825-137, HESS J1826-130,
	PSR J1826-1256	PSR	1.6	14.4	3.6×10^{36}	2HWC J1825-134
LHAASO J1839-0545	PSR J1837-0604	PSR	4.8	33.8	2.0×10^{36}	2HWC J1837-065, HESS J1837-069,
	PSR J1838-0537	PSR	1.3 ^e	4.9	6.0×10^{36}	HESS J1841-055
LHAASO J1843-0338	SNR G28.6-0.1	SNR	9.6 ± 0.3^f	$< 2^g$	—	HESS J1843-033, HESS J1844-030,
LHAASO J1849-0003	PSR J1849-0001	PSR	7 ^h	43.1	9.8×10^{36}	2HWC J1844-032
	W43	YMC	5.5 ^h	—	—	HESS J1849-000, 2HWC J1849+001
LHAASO J1908+0621	SNR G40.5-0.5	SNR	3.4 ⁱ	$\sim 10 - 20^j$	—	MGRO J1908+06, HESS J1908+063,
	PSR 1907+0602	PSR	2.4	19.5	2.8×10^{36}	ARGO J1907+0627, VER J1907+062,
	PSR 1907+0631	PSR	3.4	11.3	5.3×10^{35}	2HWC 1908+063
LHAASO J1929+1745	PSR J1928+1746	PSR	4.6	32.6	1.6×10^{36}	2HWC J1928+177, 2HWC J1930+188,
	PSR J1930+1852	PSR	6.2	2.9	1.2×10^{37}	HESS J1930+188, VER J1930+188
	SNR G54.1+0.3	SNR	$6.3^{+0.9}_{-0.7}$	$1.8 - 3.3^k$	—	—
LHAASO J1956+2845	PSR J1956+2846	PSR	2.0	21.7	3.4×10^{35}	2HWC J1955+285
	SNR G66.0-0.0	SNR	2.3 ± 0.2^l	—	—	—
LHAASO J2018+3651	PSR J2021+3651	PSR	$1.8^{+1.7}_{-1.1}$	17.2	3.4×10^{36}	MGRO J2019+37, VER J2019+368,
	Sh 2-104	H II/YMC	$3.3 \pm 0.3^m / 4.0 \pm 0.5^m$	—	—	VER J2016+371
LHAASO J2032+4102	Cygnus OB2	YMC	1.40 ± 0.08^o	—	—	TeV J2032+4130, ARGO J2031+4157,
	PSR 2032+4127	PSR	1.40 ± 0.08^o	201	1.5×10^{35}	MGRO J2031+411, 2HWC J2031+415,
LHAASO J2108+5157	SNR G79.8+1.2	SNR candidate	—	—	—	VER J2032+414
LHAASO J2226+6057	SNR G106.3+2.7	SNR	0.8 ^p	$\sim 10^q$	—	VER J2227+608, Boomerang Nebula
	PSR J2229+6114	PSR	0.8 ^p	$\sim 10^q$	2.2×10^{37}	—

✓ 100 TeVが受かったのはほとんどPWN?

加速エネルギーの時間発展の系統的調査

- ☑ SNRの最大加速エネルギー(\propto 衝撃波速度) は経年変化
- ☑ 若いSNR (~100 yr) の衝撃波でのみ、PeVまで加速可能 [Ptuskin+2003] ?

38個のガンマ線SNRを用いた系統的調査
[Suzuki+ 2022]



$$E_{\text{cut}} \propto t_{\text{age}}^{\alpha}, \alpha = -0.81 \pm 0.24$$

→ 非常に緩やかな相関
若くともPeVまでいかない?

- ☑ ただし、SNRからのガンマ線スペクトルは年齢/環境 に大きく依存する [Yasuda+ 2019]

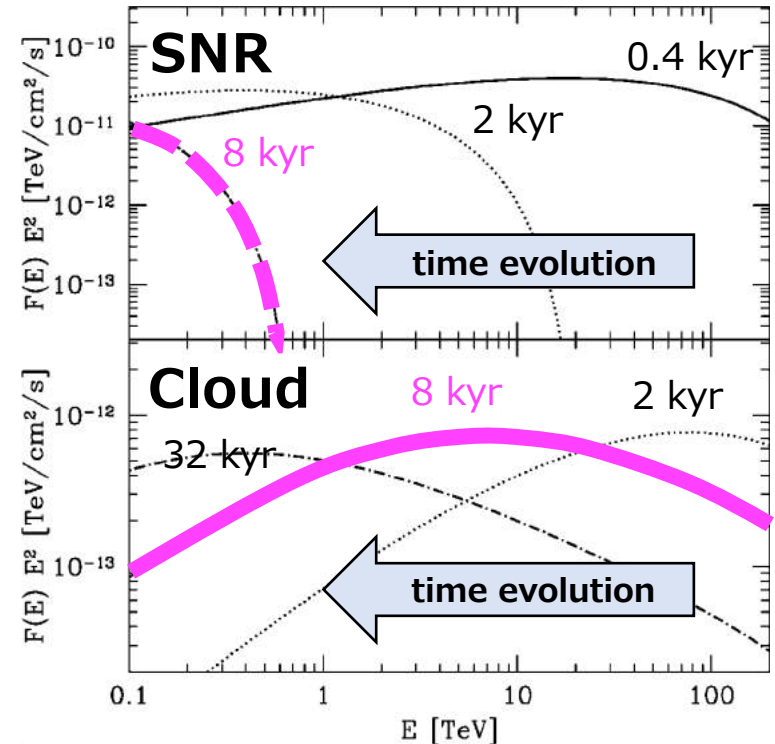
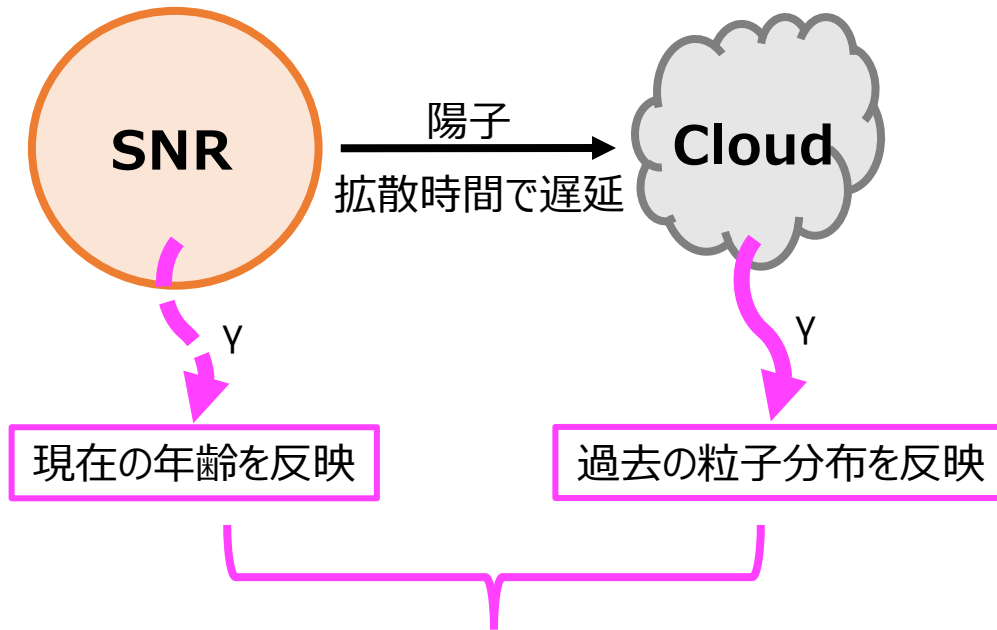
		$T_{\text{age}} = 50 \text{ yr}$	500 yr	5,000 yr	> 10,000 yr
previous picture		No obs.	hadronic	leptonic	hadronic
uniform ISM	0.01 cm^{-3}	leptonic	leptonic	leptonic	
	0.1 cm^{-3}	leptonic	mixed	hadronic	
	1.0 cm^{-3}	hadronic	hadronic	hadronic	
power-law CSM	$10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$	mixed	leptonic	leptonic	
	$10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$	hadronic	mixed	leptonic	
	$10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$	hadronic	hadronic	mixed	

第18回高宇連安田氏スライドより

他に、DSAの時間発展を定量化する術はないか

単一SNRのDSAの時間発展を調べるには

SNRが陽子PeVatronだったことを仮定したときのガンマ線スペクトル [Gabici+ 2007]



これら2領域 (SNR+Cloud or Cloud 2つ)以上でのスペクトルを観測できれば
単一SNR衝撃波面における粒子分布の時間発展を辿れる

重要なのは「SNRとCloudが視線方向上に重ならないこと」

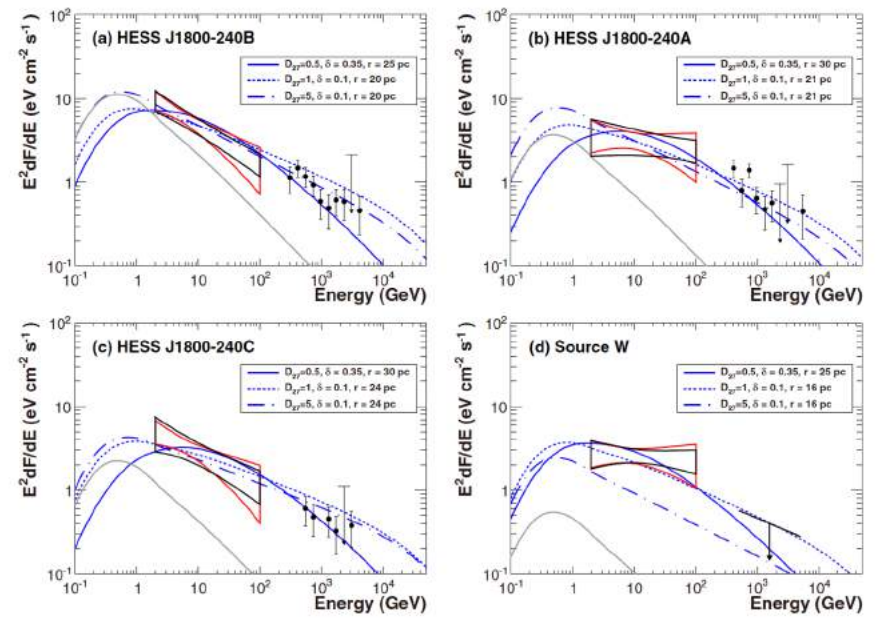
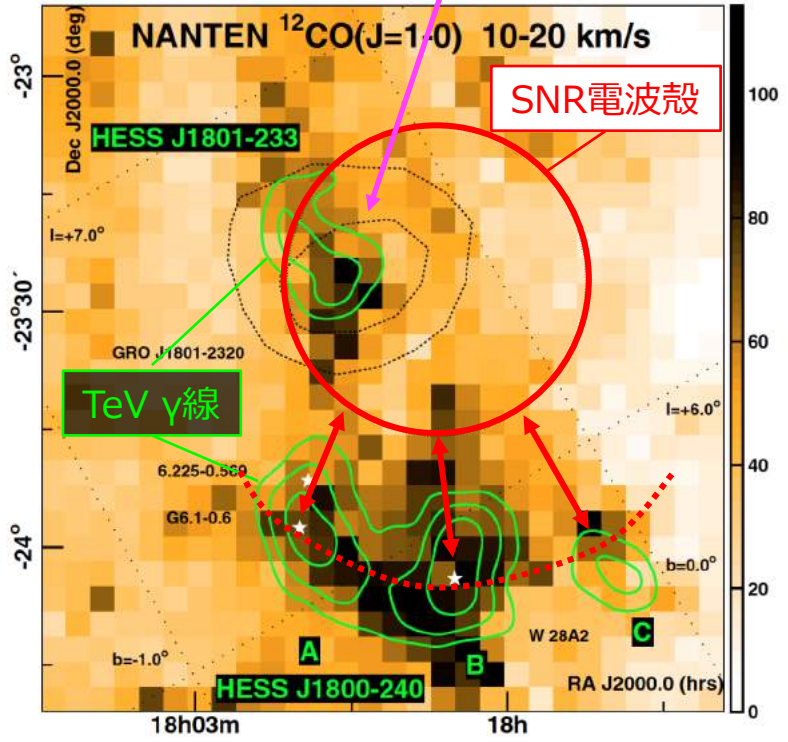
これまでの“遅延ガンマ線”の観測例

W28 SNR (~32000才)

[Aharonian+2008, Hanabata+2014]

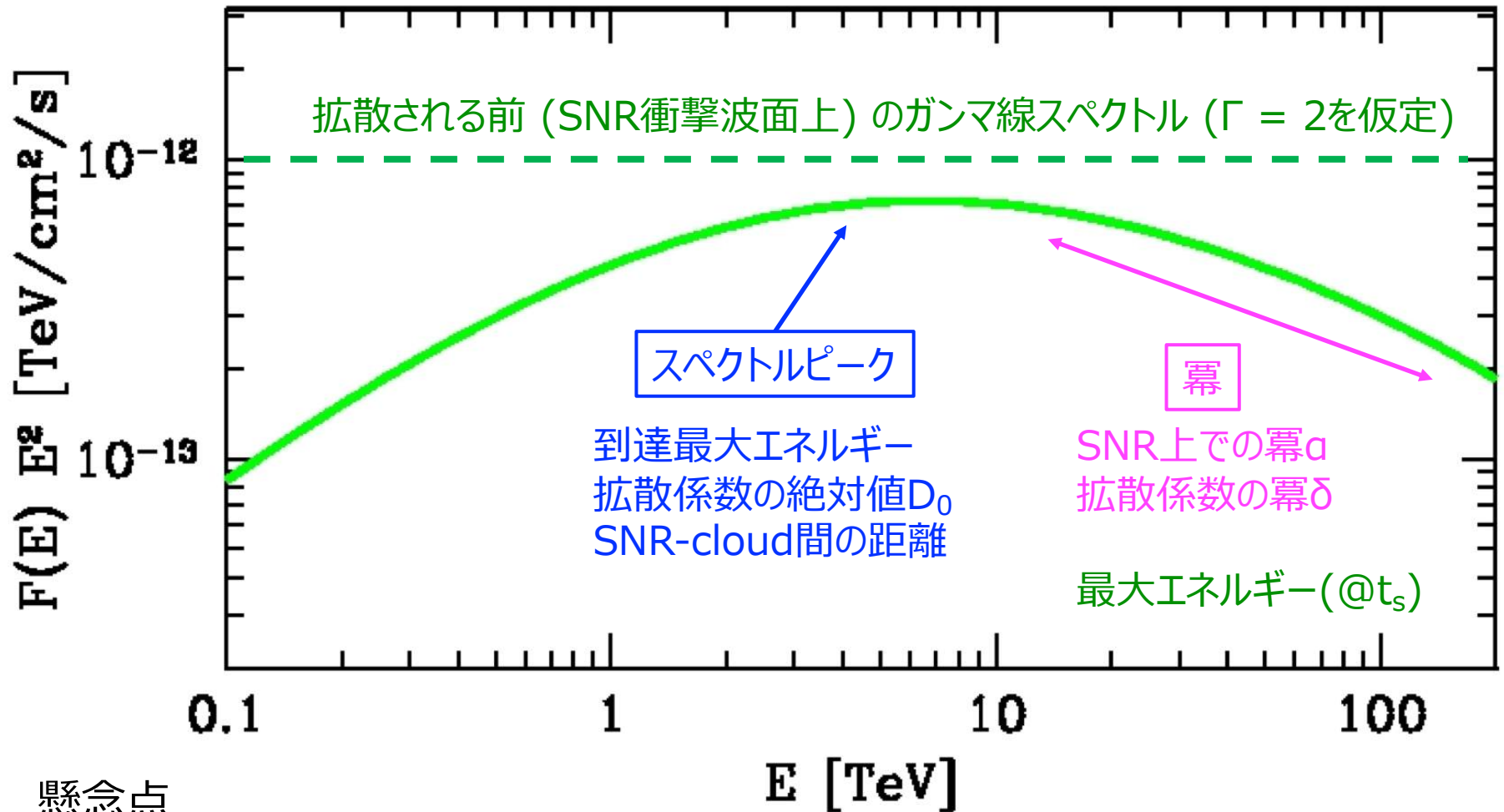
- SNR本体から2次元的に離れた分子雲3地点からのGeV-TeVガンマ線放射を検出
- ✗ 反映する年齢は同程度でスペクトルに有意な差無し
- ✗ SNR北西の雲ではshock-cloud相互作用による再加速 → SNR本来の年齢を反映しない
- ✗ SNR本体からのγ線放射も検出されず

¹²CO (NANTEN) vs TeV (H.E.S.S.)



他、W44 SNR (~25000才) でも分子雲からのγ線を検出したが [Uchiyama+2012]、複数年代の粒子分布取得に至っていない

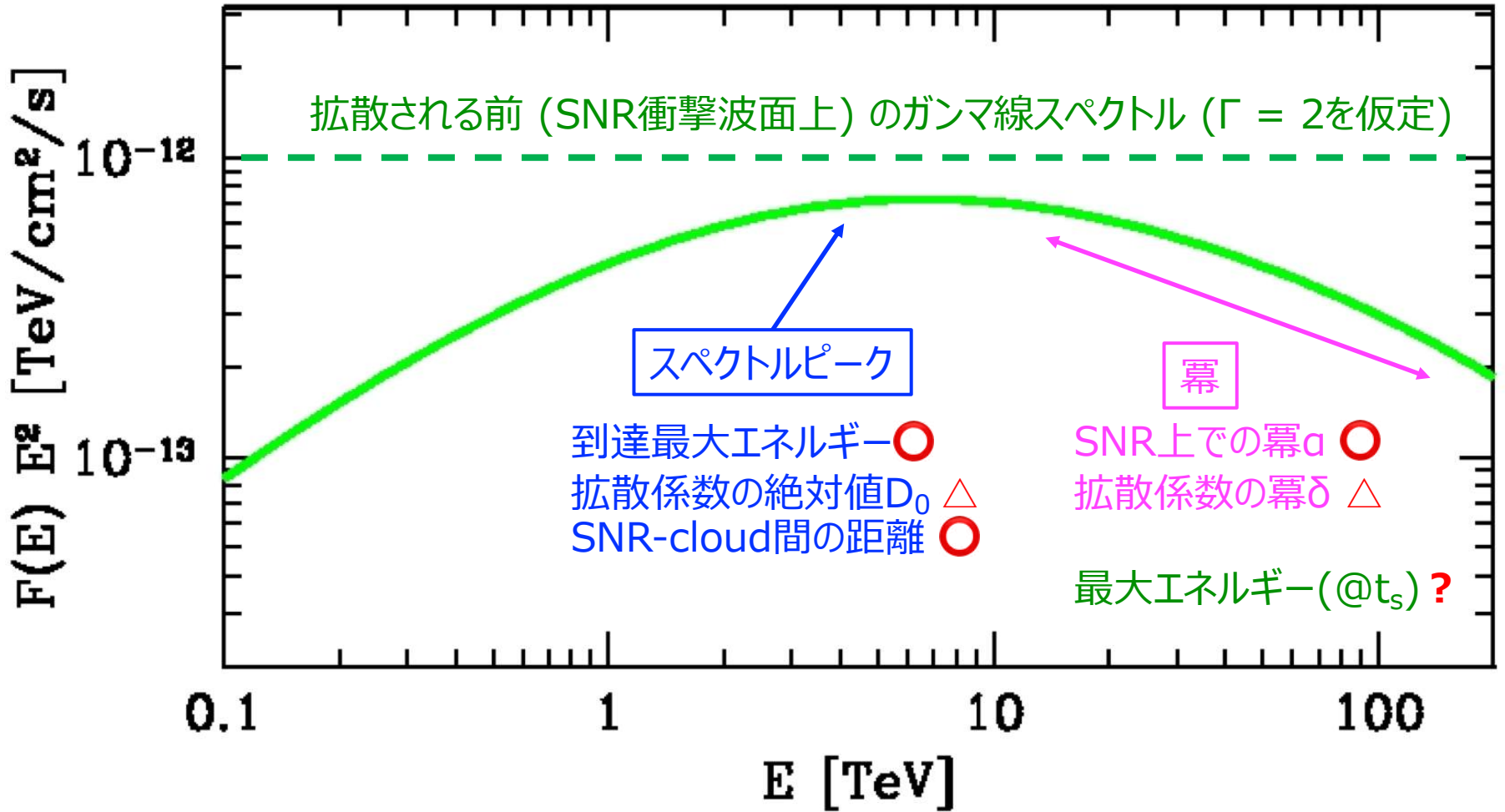
遅延ガンマ線スペクトルの決まり方



懸念点

- ☑ 不定性の大きなパラメータが複数縮退する
- ☑ スペクトルピークがはっきり見えないとすると、さらにパラメータ決定が難しくなる

遅延ガンマ線スペクトルの決まり方



- ・ 現在のSNR殻の冪や加速エネルギーに制限がつけられるもの
- ・ スペクトルピークが見えるもの

比較的若い天体が良い

着目する天体: SNR HB9 (G160.9+2.6)

6600才 (Sedov年齢)、天体までの距離 0.8 ± 0.4 kpc [Leahy & Tian, 2007]

利点1

SNR電波殻と空間的に相関する
GeV γ 線放射が検出 [Araya 2014]



現在のSNRでの宇宙線分布を調べられる

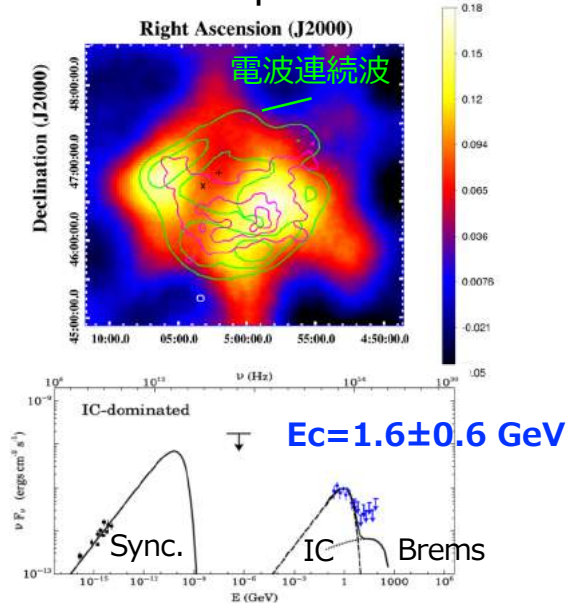
利点2

SNR電波殻から二次元的に離れて存在する
分子雲が存在 [Sezer+2019]

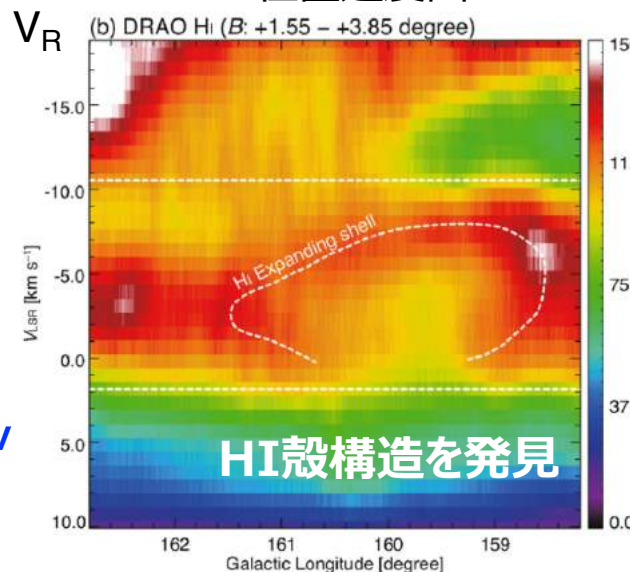


拡散時間 (拡散距離) を推定可能

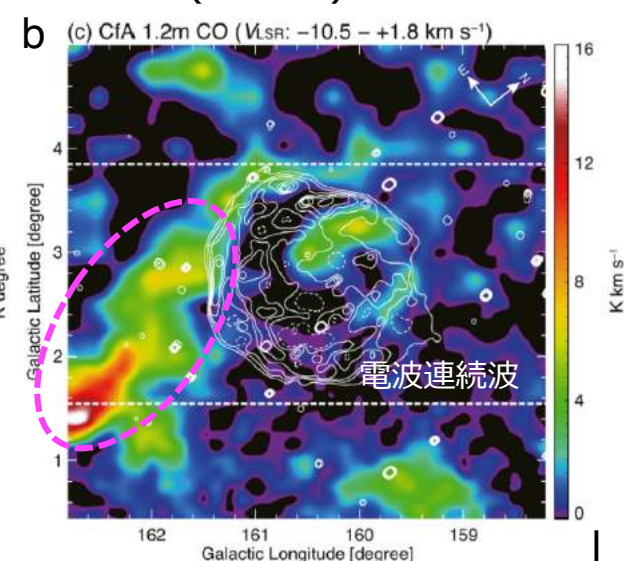
Fermi-LAT γ 線放射分布



HI 位置速度図



¹²CO (J=1-0) 輝度分布

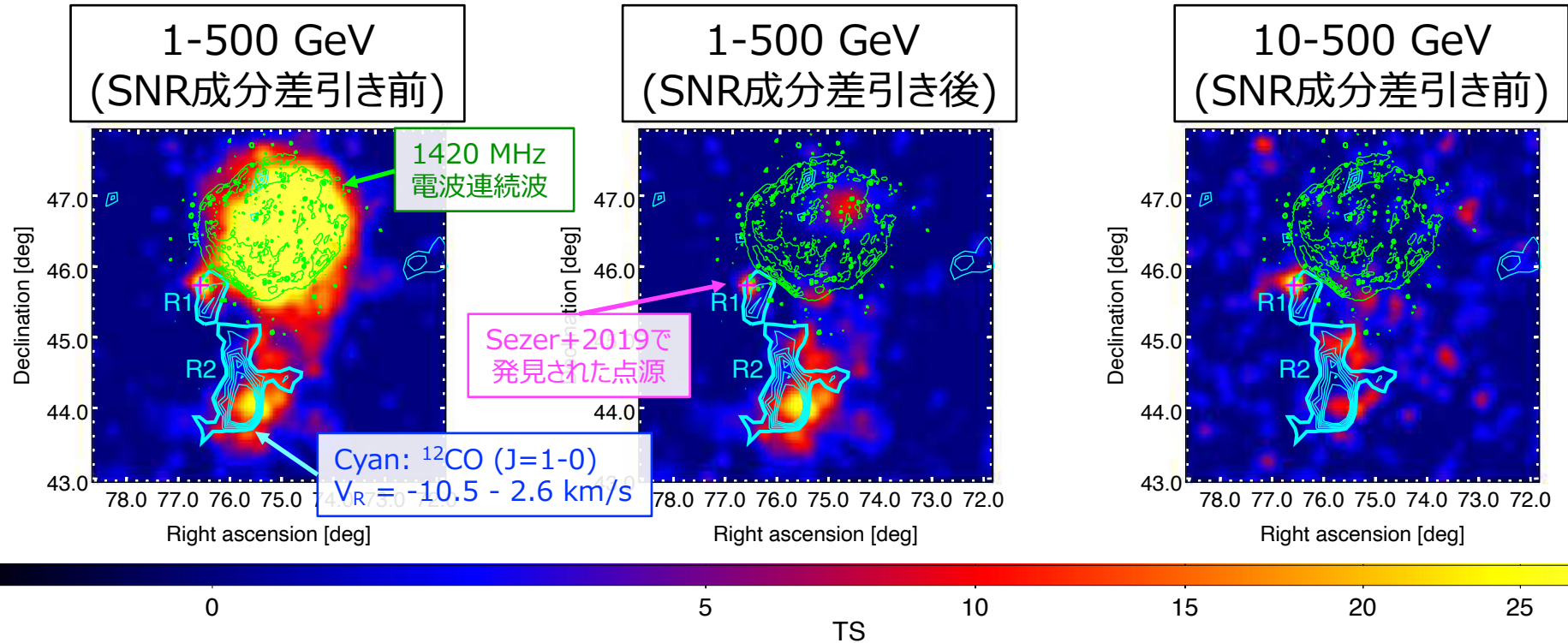


分子雲からの γ 線放射は未検出

[本研究] GeV帯域で最も良い感度を誇る Fermi-LAT 12年データを解析

HB9周りのガンマ線の空間分布

- *Fermi*-LAT PASS 8、12年データ (2008 - 2020) を使用
- BGモデル: Galactic diffuse + Isotropic + 4FGL Catalog点源ソース
SNR成分は4850 MHz電波連続波マップから空間分布を仮定し差引く

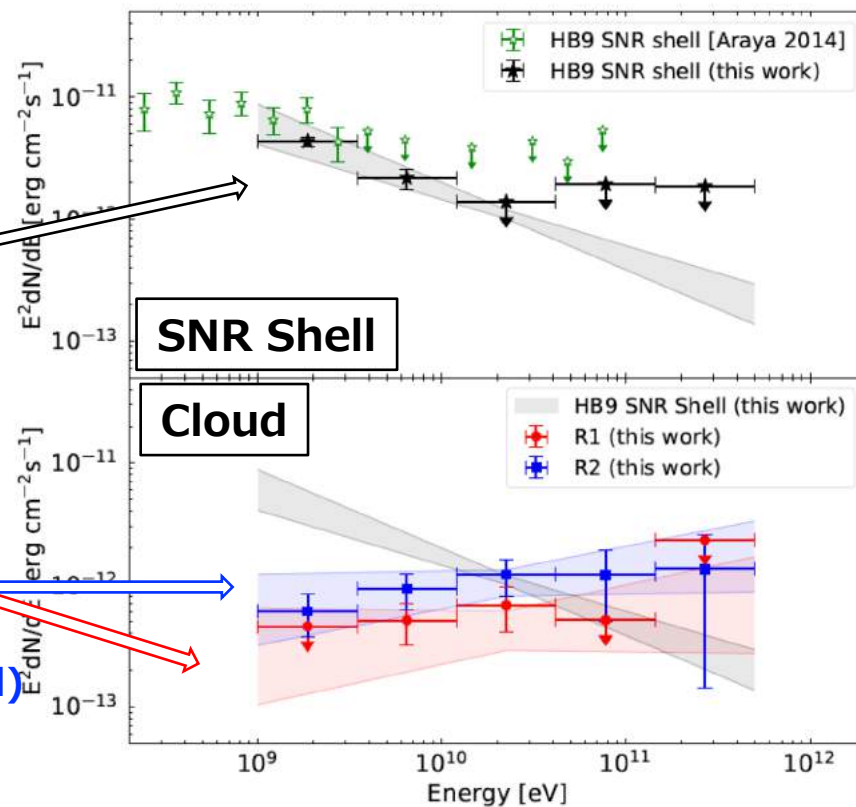
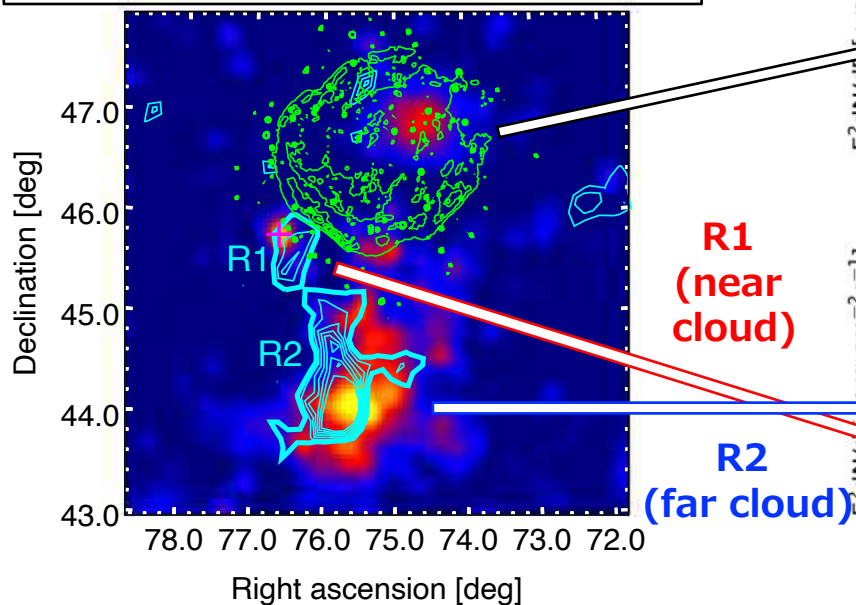


- ✓ 電波殻の外に広がったガンマ線放射を発見
 - 一部は先行研究で見つかった未同定点源PS J0506.5+4546 と一致
 - 分子雲領域 (CO輝線) と空間的に一致 → 陽子起源を示唆
- ✓ SNR Shellからの放射と比べ、高エネルギー(>10 GeV)でも有意

ガンマ線のエネルギースペクトル

2領域 R1・R2に分離して
(CO輝線分布を仮定) スペクトル算出

1-500 GeV (SNR殻成分差引き後)



	Flux 1-500 GeV [$10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Index	$\sqrt{\text{TS}}$
HB9 Shell	24.3 ± 2.1	2.55 ± 0.10	12.8
R1 (near cloud)	2.0 ± 0.8	1.84 ± 0.18	4.5
R2 (far cloud)	4.8 ± 1.2	1.84 ± 0.14	6.1

遅延ガンマ線のモデル

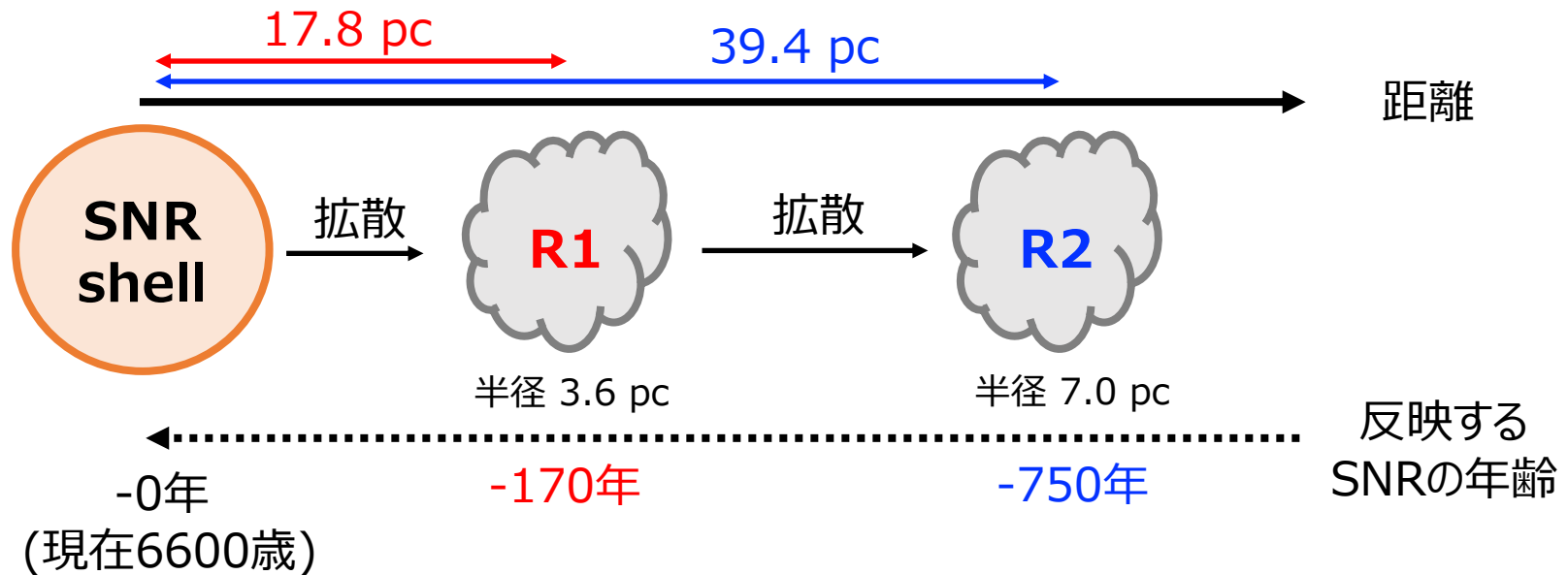
- ☑ SNRから逃げ出した宇宙線分布を1次元球対称で拡散方程式で解く
[Gabici+2007, 2009, Ohira+ 2011]

$$\frac{\partial f_{p,\text{out}}(t, r, E)}{\partial t} - D_{\text{ISM}}(E) \Delta f_{p,\text{out}}(t, r, E) = q_{p,s}(t, r, E), \quad (3)$$

- ☑ 注入される宇宙線の最大加速エネルギーは年齢に冪関数に変化すると仮定
- Sedov期になった時に $E_{\text{max}} = 3 \text{ PeV}$ まで加速されていると仮定
 - 現在の E_{max} は観測されたスペクトルより推定

$$E_{\text{esc}}(t) = E_{\text{max}} \left(\frac{t}{t_{\text{Sedov}}} \right)^{-\alpha},$$

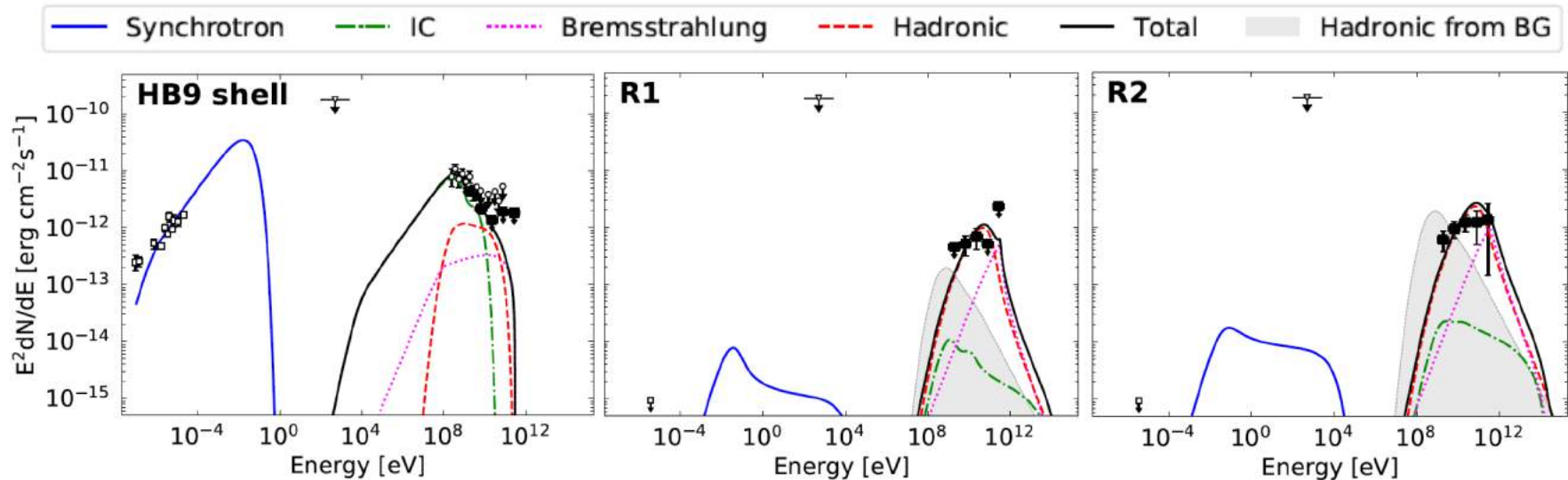
- ☑ SNR-分子雲の距離: 電波CO輝線観測から求まる2次元角距離を使用
(3次元奥行き方向の不定性はあるものの下限値として使える)



- ☑ 拡散係数: $D(E) = D_0 E^\delta = 3 \times 10^{28} (E/10 \text{ GeV})^{1/3} \text{ cm}^2/\text{s} \sim$ 銀河系内平均

モデリング結果

☑ SNR Shell、分子雲領域のスペクトルを同時に再現可能



Shell:

Synchrotron ($B=8 \mu\text{G}$)
+ IC (CMB + dust)

Cloud: π^0 decay

(標的ガス密度:
150 cm⁻³ for R1, 200 cm⁻³ for R2)

その他のパラメータ

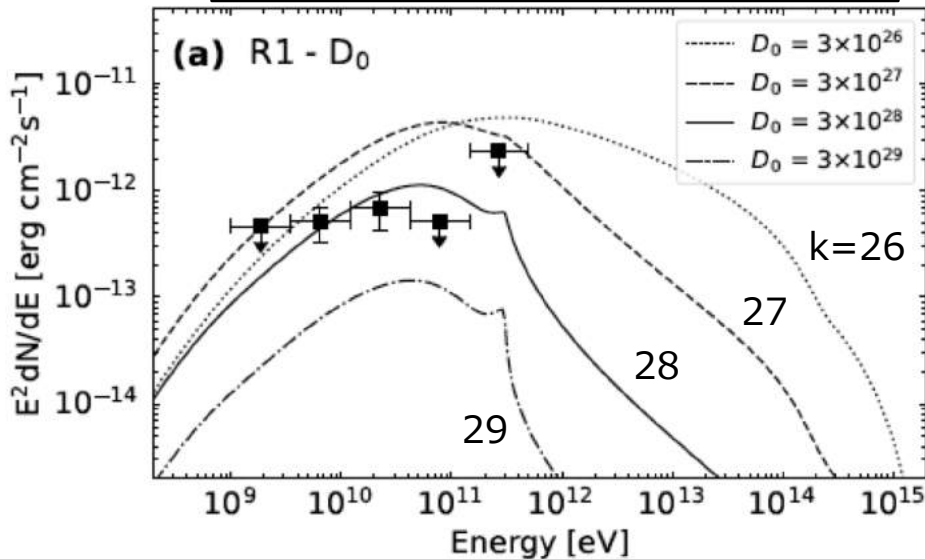
- 超新星爆発の総エネルギー $E_{\text{SN}} = 0.3 \times 10^{51}$ erg [Leahy+2007]
- ISM物質密度 $n_{\text{ISM}} = 0.06$ cm⁻³ [Leahy+2007]
- 電子陽子比 = 2%
- 拡散係数: $D(E) = D_0 E^\delta = 3 \times 10^{28} (E/10 \text{ GeV})^{1/3}$ cm²/s \sim 銀河系内平均
- 現在のShellでの $E_{\text{max}} = 300$ GeV (Sedov突入時 3 PeV)

モデルパラメータ依存性 D_0

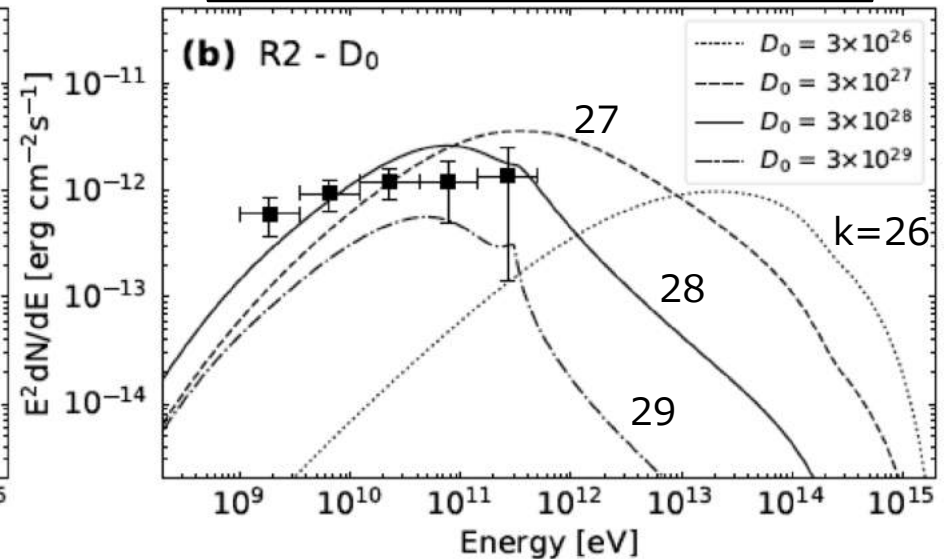
SNR周辺では宇宙線による磁場乱流が起こり、 $D_0 \sim 10^{25-26}$ と小さくなることが期待
[Wentzel 1974] → W28 [Fujita+2009] などのSNRでも示唆

拡散係数 $D_0(E/10 \text{ GeV})^\delta$ の内、 D_0 について $3.0 \times 10^k \text{ cm}^2/\text{s}$, $k=26-29$ で値を振る

R1 (SNRから近い分子雲領域)



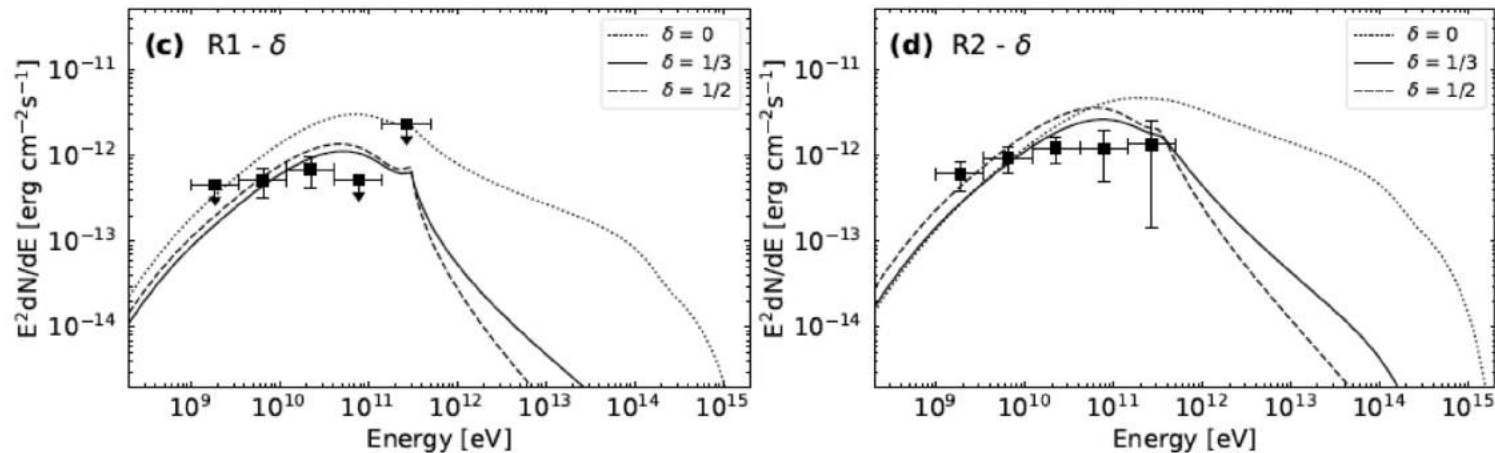
R2 (SNRから遠い分子雲領域)



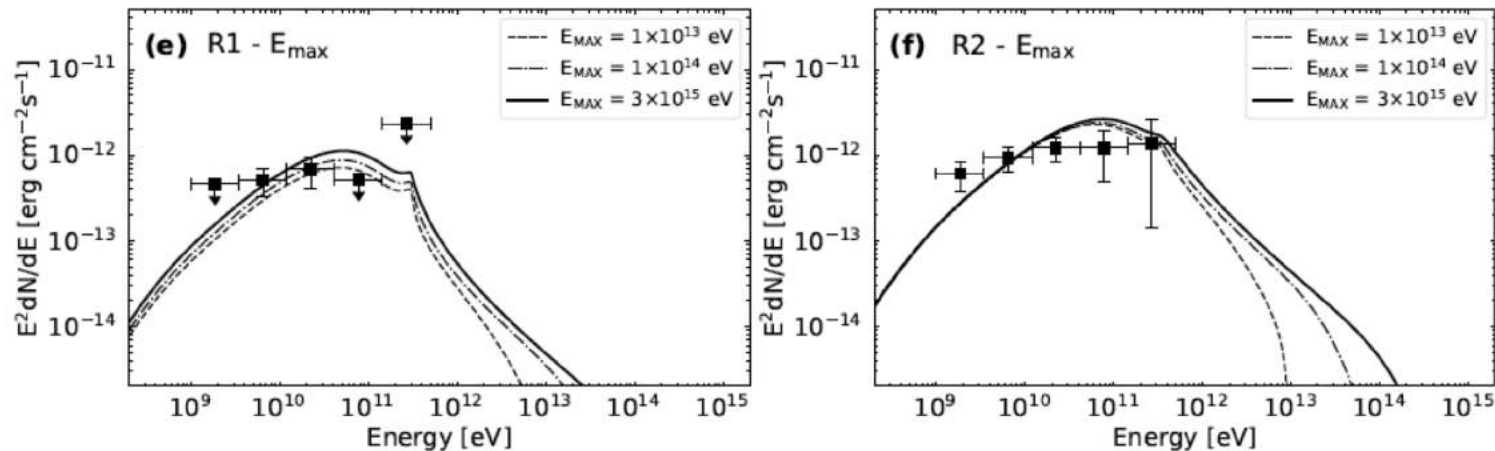
HB9 (本研究)では、 $D_0@10 \text{ GeV} = 3 \times 10^{28} \text{ cm}^2/\text{s} \sim$ **銀河系内平均** が観測を再現
→ 分子雲-SNRが十分に離れており、Cloudが宇宙線の影響を受けていないことを示唆

モデルパラメータ依存性 δ & E_{\max}

拡散係数のエネルギー依存性 δ : 0, 1/3, 1/2

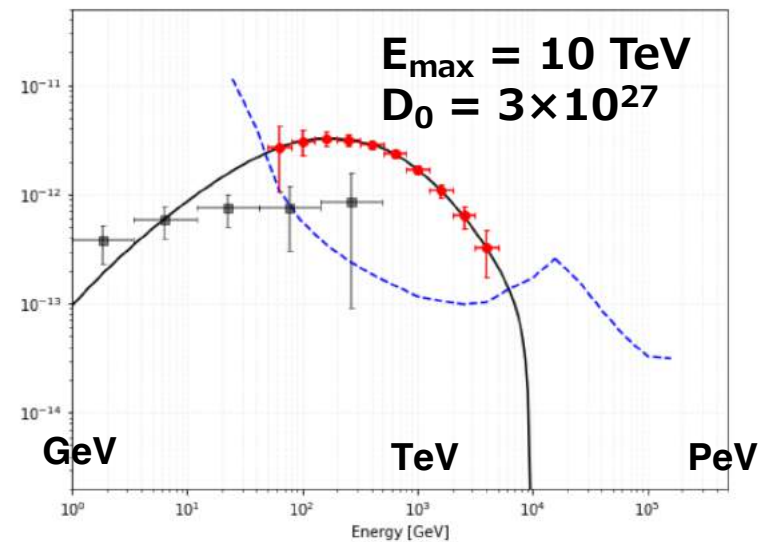
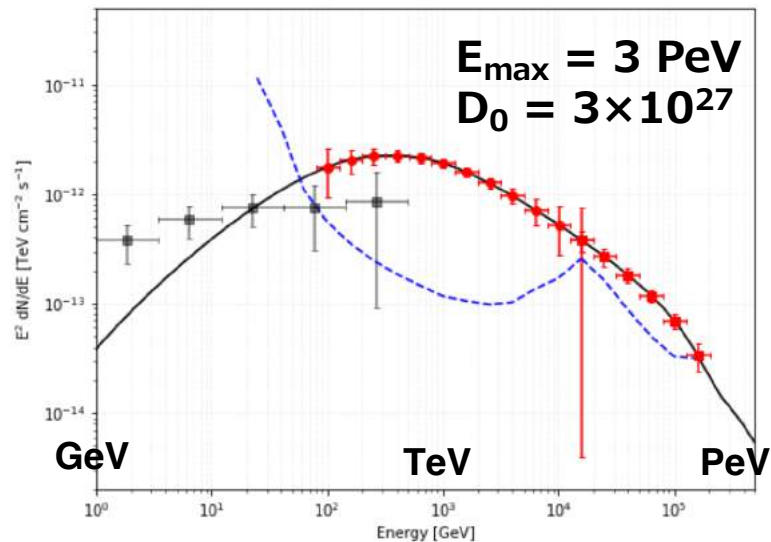
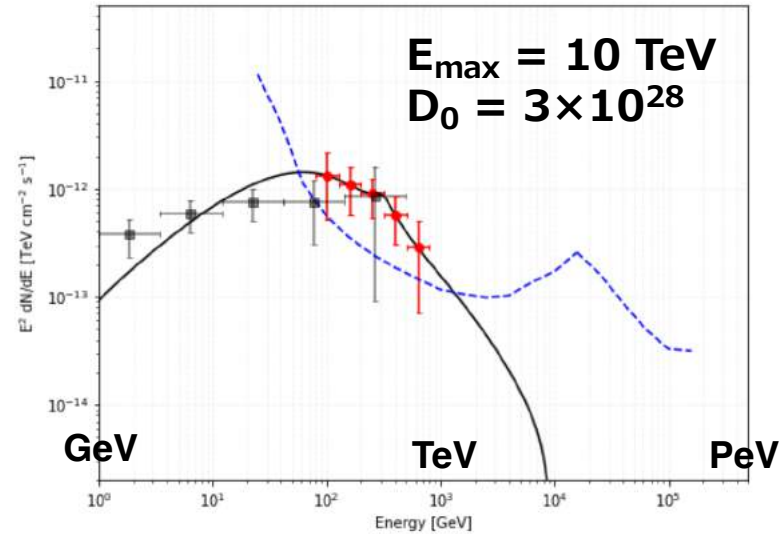
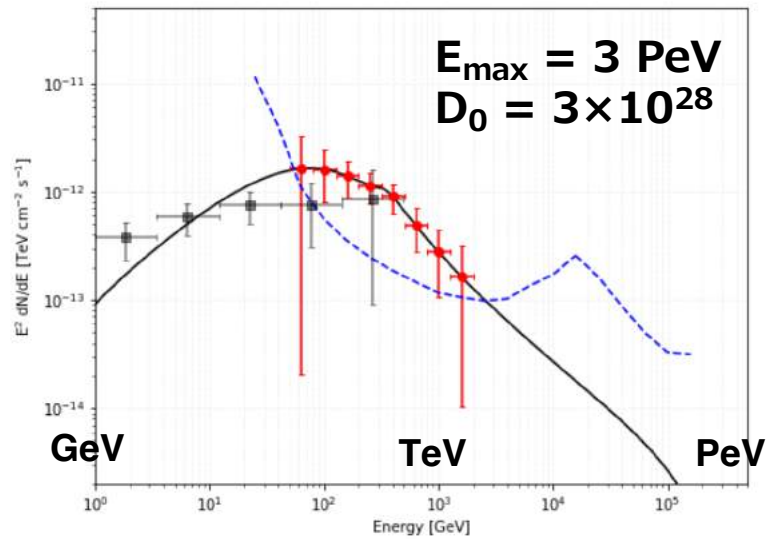


Sedov期突入時の最大加速エネルギー E_{\max} : 3 PeV, 100 TeV, 10 TeV



☑ GeV帯域ではモデルに大きな違いは出ない → TeV-PeVの観測へ期待できるか

CTA/LHAASOへの期待



感度曲線: (点源に対する) CTA-North 50 hr、LHAASO 1 yrの検出感度
 PSF (CTA) = 0.05度, LHAASO = 0.3度に対し、広がり \sim 0.36度と仮定

<https://www.cta-observatory.org/science/ctao-performance/>
[\[arXiv:1905.02773\]](https://arxiv.org/abs/1905.02773)

まとめ

- ☑ SNRが過去にPeVatronである証拠を掴むため、“SNR殻”と“殻外の高密度雲”からのガンマ線放射から単一SNRにおけるDSA最大エネルギーの時間発展定量化を目指した。
- ☑ HB9 SNR (G160.9+2.6) はこのスタディに適したサンプル
 - *Fermi*-LAT 12年データ解析 (1-500 GeV) により SNR shell からの放射とは異なる、分子雲領域と相関するガンマ線を新たに発見 特に、遠い分子雲領域 (750年前のSNRを反映) からの超過 γ 線 ($>6\sigma$) を初検出
 - cloud領域の冪は ~ 1.8 と硬い (~ 2.5 @SNR shell)
- ☑ 分子雲領域の γ 線スペクトルは、SNRから逃げ出した陽子起源で観測を再現
 - 宇宙線拡散係数 = 銀河系内平均 で再現可能
 - 分子雲-SNRが離れており、CR self-confinement は起きていないことを示唆

展望

- ☑ TeV帯域の観測により最大加速エネルギーにより厳しい制限がつくと期待
 - CTA/LHAASO・ALPACAが拓くルミノシティフロンティアでこの手のスタディが進むか。

Backup

モデルパラメータ

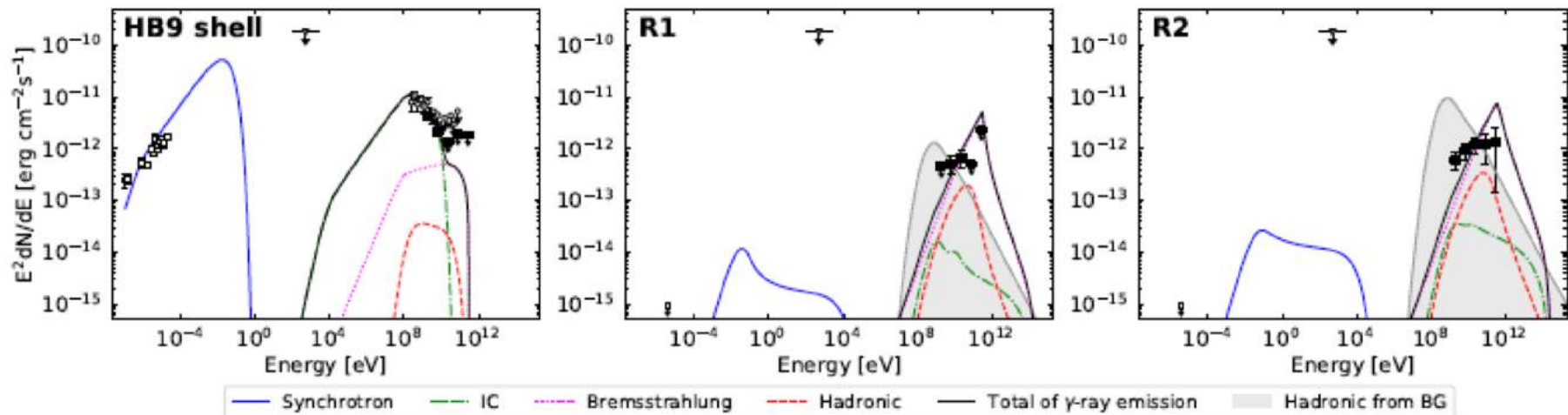
Table 2. Fiducial parameters used to calculate the model spectra

SNR parameters	Symbol		
SN explosion energy	E_{SN}	0.3×10^{51} erg	
Initial shock velocity	u_{sh}	10^9 cm s ⁻¹	
Age of the SNR	t_{age}	6.6×10^3 yr	
Distance to the SNR		0.8 kpc	
Acceleration efficiency [†]	η	0.1 (0.003)	
Electron to proton flux ratio [†]	K_{ep}	0.02 (1)	
Maximum CR energy at $t = t_{\text{Sedov}}$	E_{max}	3 PeV	
Current maximum energy of CRs	E_{now}	300 GeV	
Magnetic field in the SNR	B_{SNR}	8 μG	
Particle index in the SNR	p_{SNR}	2.0	
Particle index after escaping from SNR	p_{esc}	2.4	
ISM parameters	Symbol		
Number density	n_{ISM}	0.06 cm ⁻³	
Diffusion coefficient at $E = 10$ GeV	D_0	3×10^{28} cm ² s ⁻¹	
Index of dependence on E of diffusion	δ	1/3	
Magnetic field in ISM	B_{ISM}	3 μG	
Molecular cloud (MC) parameters	Symbol	R1	R2
Distance to the MC from SNR	d_{cl}	17.8 pc	39.4 pc
Radius of the MC	R_{cl}	3.6 pc	7.0 pc
Average hydrogen number density [†]	n_{H}	150 (1000) cm ⁻³	200 (1000) cm ⁻³
Mass of the MC [†]	M_{cl}	730 (4800) M_{\odot}	7100 (36000) M_{\odot}
Reflected SNR age	t_{ref}	-1.7×10^2 yr	-7.5×10^2 yr
Magnetic field in MC	B_{MC}		3 μG

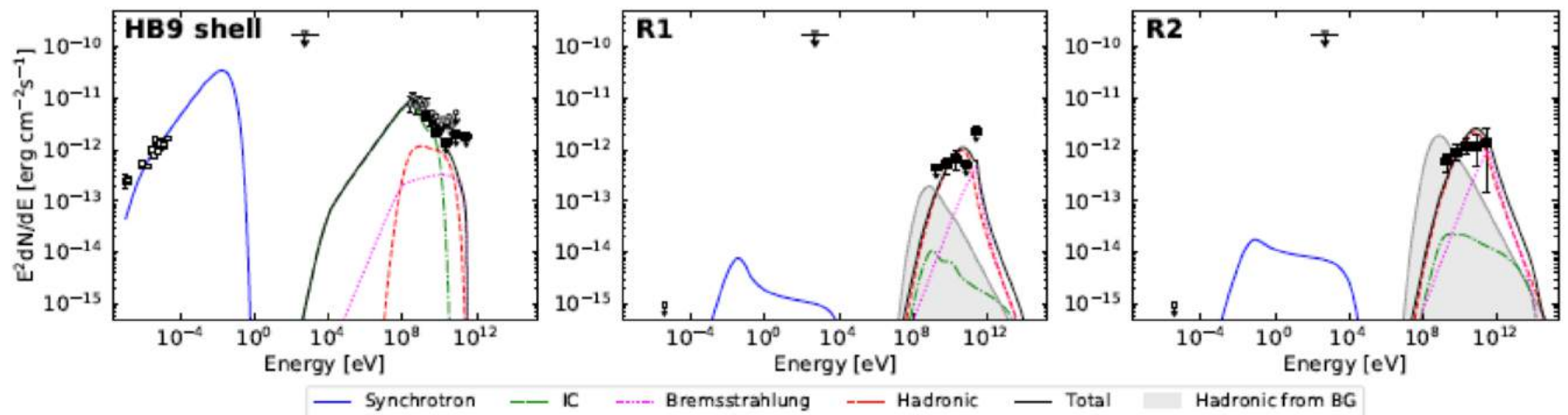
Leptonic-dominated model

Leptonic-dominated model

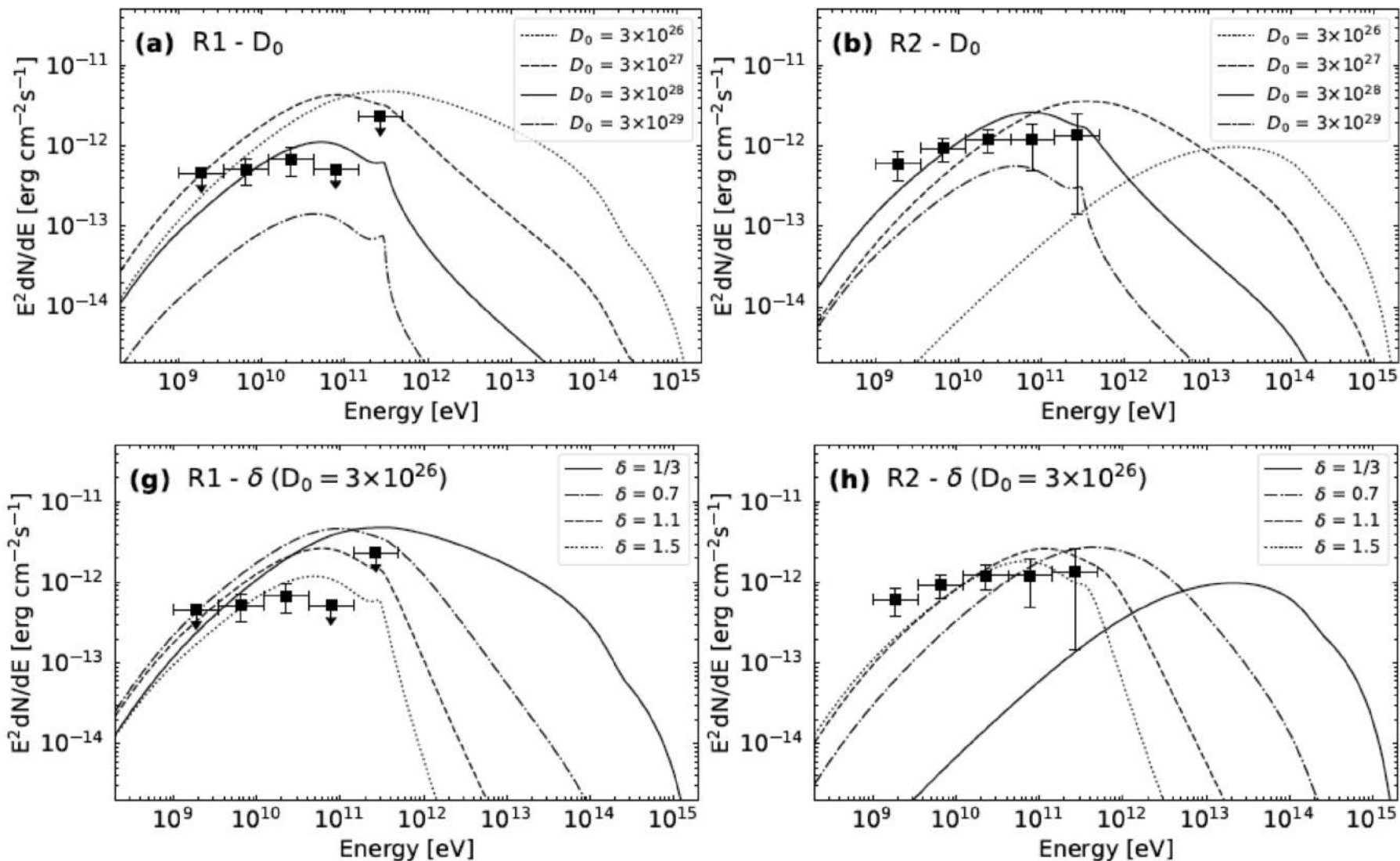
☑ 冪 ~ 1.3 となり、観測された冪 ~ 1.8 と合わない



Hadronic-dominated model

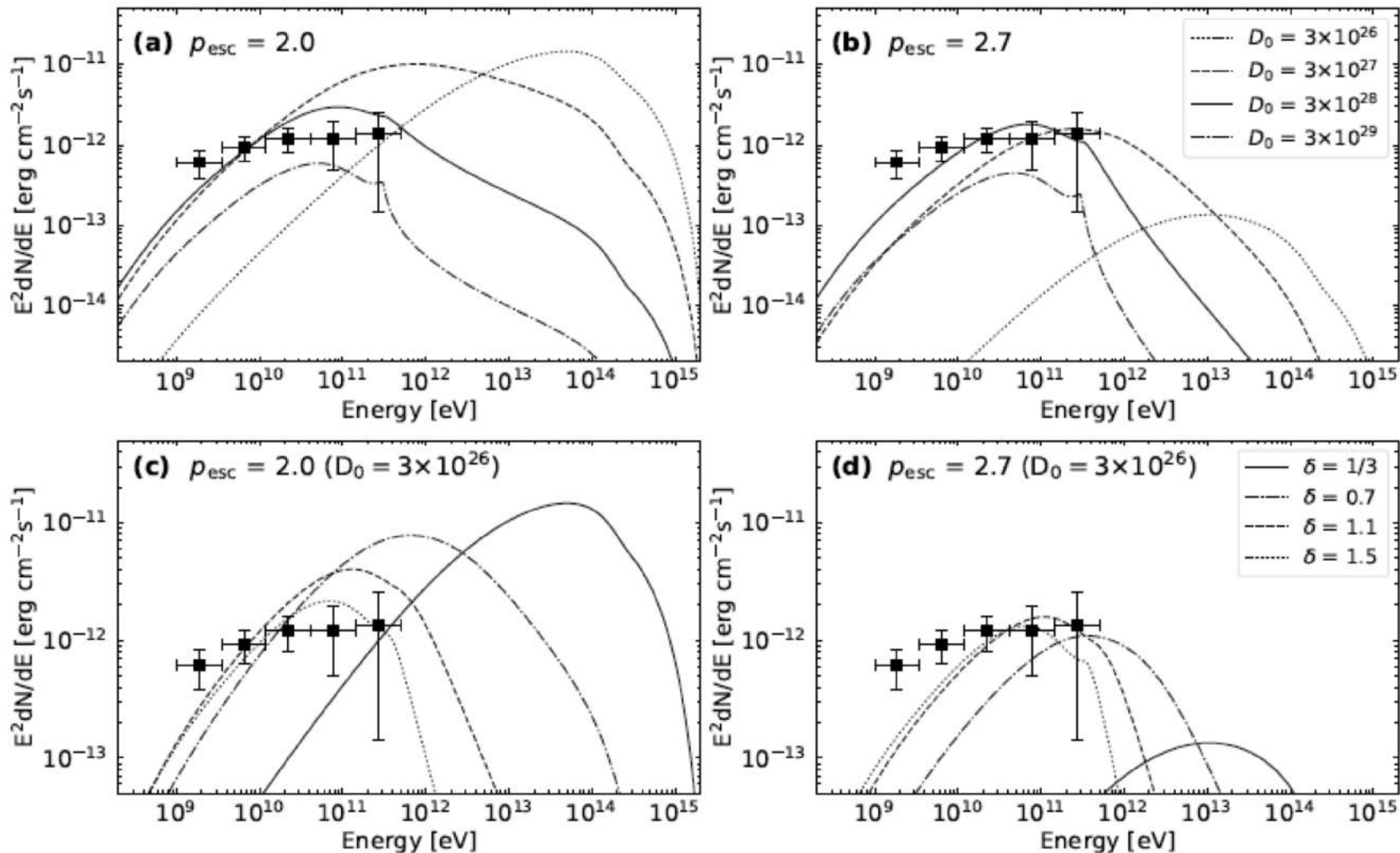


拡散係数の決定精度



☑ $\delta > 1.0$ を要求 → 理論・観測と不一致

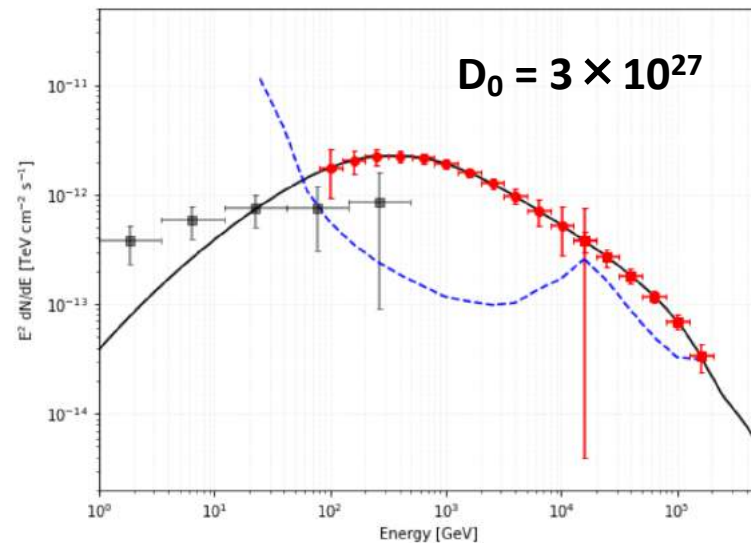
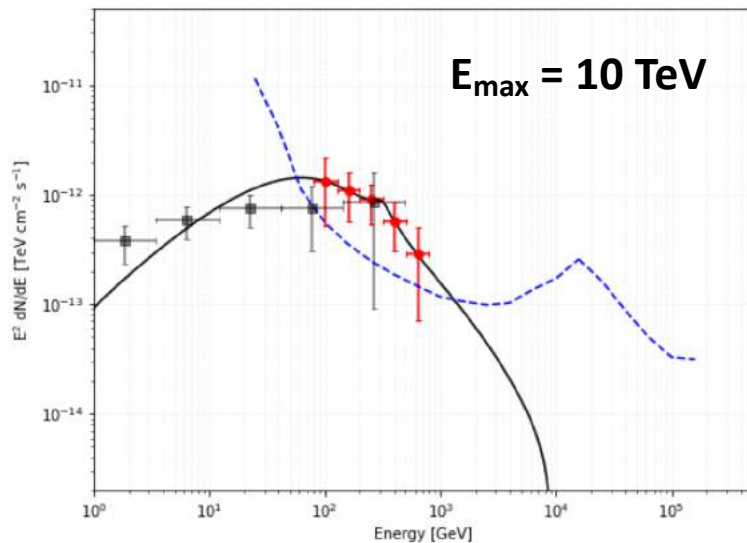
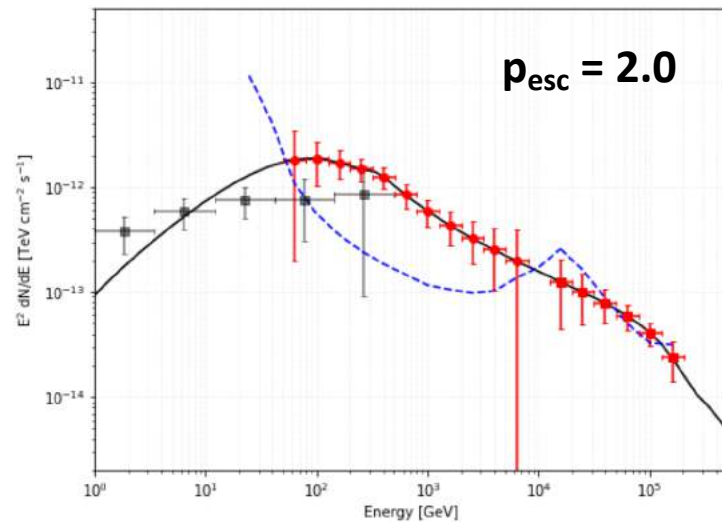
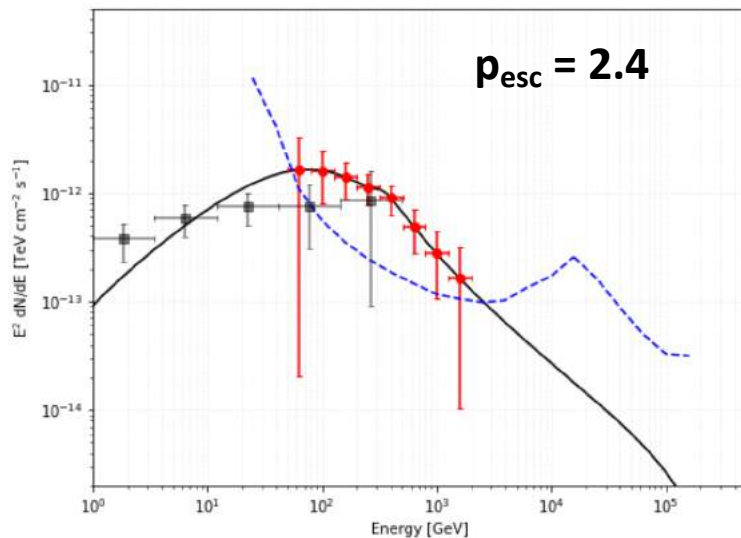
拡散係数の決定精度 (p_{esc})



☑ $\delta > 1.0$ を要求 \rightarrow 理論・観測と不一致

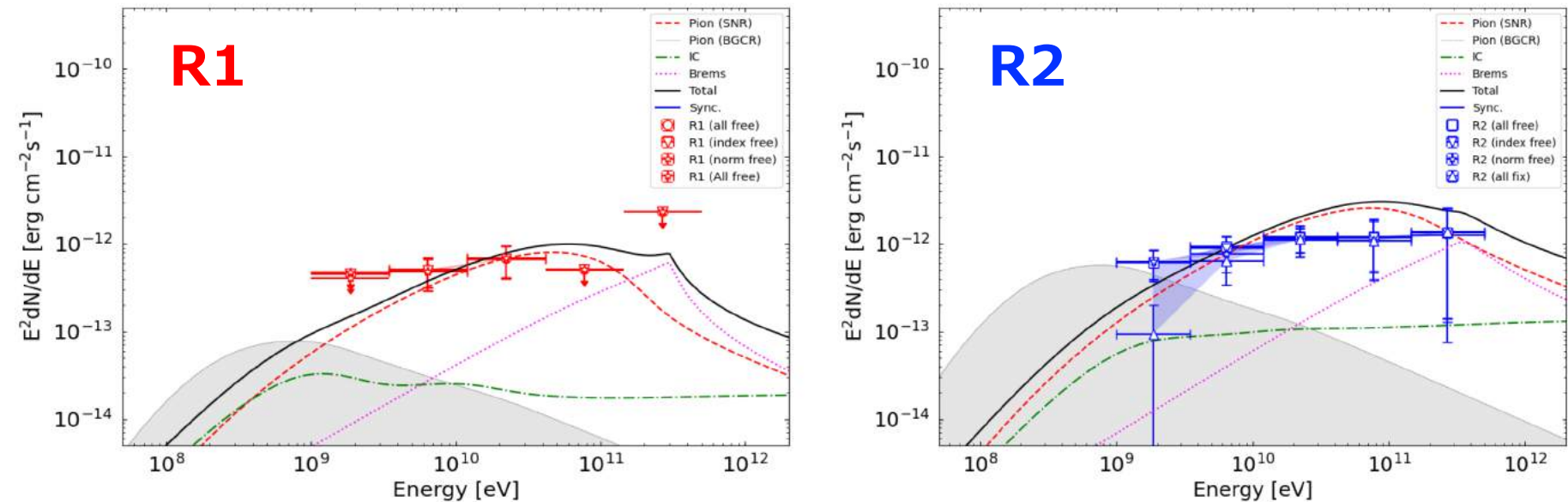
CTA/LHAASOへの期待

PSF (CTA) = 0.05 deg, LHAASO = 0.3 degに対し、広がり ~ 0.36 度と仮定



BGモデルによる系統誤差

Galactic Diffuse Background model のパラメータをfree/fixにした場合でスペクトルがどの程度ふらつくかを確認。



BGモデル自体に5–10%の誤差がある [Ackermann+ 2012] ので、S/Nが悪くなると系統誤差として効いてくる